

РАСЧЁТ ПРОГРЕВА БУМАЖНОГО ПОЛОТНА

Рассмотрен вопрос создания оптимального температурного графика прогрева бумажного полотна. Особое внимание уделено показателям качества бумажного полотна и влиянию на них интенсивности нагревания. Разработан алгоритм расчёта оптимального температурного графика, который обеспечивает максимально быстрый прогрев полотна при соблюдении ограничений на качественные показатели.

Ключевые слова: производство бумаги, температурный график прогрева, параметры качества, оптимальное управление.

© Жученко А. И., Черёпкин Е. С., 2014.

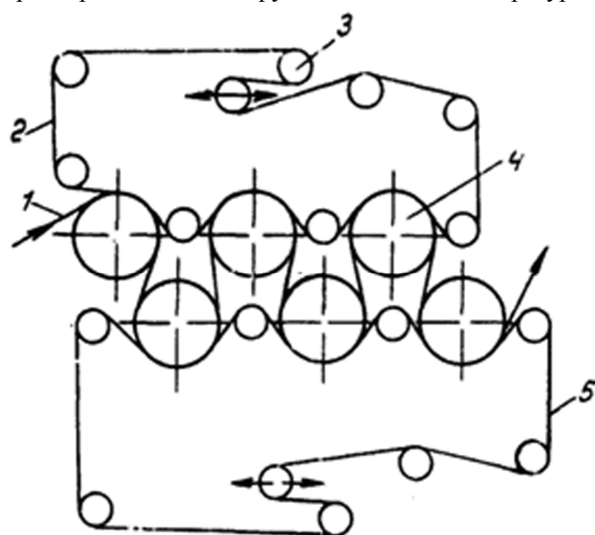
Постановка проблемы. Влажное бумажное полотно после прессования поступает в сушильную часть бумагоделательной машины (БДМ), основное назначение которой заключается в испарении влаги из материала до конечной относительной влажности 5...8 % [1].

Сушка является энергоёмким процессом. Сушильная часть БДМ потребляет примерно 30...43 % всей энергии, расходуемой для испарения примерно 1,5 % всей влаги (1,5...2,5 кг воды с 1 кг бумаги), подлежащей удалению из бумажного полотна на всей (БДМ) [2].

Сушильная часть бумагоделательной машины состоит из 10...80 цилиндров диаметром 1500...1800 мм. Они располагаются в шахматном порядке в два яруса (рис. 1) [2]. Бумажное полотно, охватывая каждый из них по дуге 225...235°, попеременно соприкасаясь то одной, то другой стороной с нагретой поверхностью, нагревается, и из него удаляется влага. Между сушильными цилиндрами полотно проходит по участку свободного хода, где удаление влаги осуществляется за счёт её нагрева на сушильном цилиндре. Такой способ сушки называется контактно-конвективным и широко применяется в современных БДМ.

Сушильные цилиндры нагревают перегретым паром, который подают при давлении 0,5...1,0 МПа и температуре 120...165 °С. Из-за потерь при теплообмене между паром и стенкой цилиндра температура его поверхности на 15...20 °С ниже, чем у пара внутри него, бумажного полотна – на 15...30 °С ниже, чем у сушильного цилиндра.

Процесс сушки состоит из нескольких стадий: прогрева материала (повышение температуры бумаги до «рабочего» значения), участка постоянной скорости сушки (удаление основной массы воды из бумажного полотна) и участка падающей скорости сушки (досушивание бумаги) [2]. Для каждой стадии определяющей является динамика изменения температуры и влажности бумаги, что обусловлено их тесной связью с параметрами качества, другими словами, температурный график сушки.



1 – полотна бумаги; 2 – верхняя сушильная сетка;
 3 – направляющие валики; 4 – сушильный цилиндр;
 5 – нижняя сушильная сетка

Рис. 1 – Двухрядная схема расположения цилиндров с двумя сушильными сетками (традиционная схема)

Анализ предыдущих исследований.

Исследованию температурного графика сушки посвящено большое количество работ [3–7]. Но лишь в некоторых из них [4, 6, 7] стадии прогрева бумажного полотна уделено отдельное внимание. Анализ данных работ позволяет сделать следующие выводы:

1. Прогрев занимает 5...15 % общего времени пребывания бумаги в сушильной части.
2. Плавное повышение температуры бумаги способствует формированию качественного полотна.
3. Прогрев полотна заканчивается при достижении бумагой температуры мокрого термометра.
4. Основной причиной недостаточной изученности процесса является его малая, по сравнению с двумя другими стадиями, продолжительность.
5. В работах даны лишь общие указания по расчёту температурного графика. Вместе с тем, для повышения эффективности сушки целесообразно создать систему автоматического управления данным процессом, включающую алгоритм расчёта оптимального температурного графика.

Во время прогрева бумажного полотна удаления влаги практически не происходит [3, 4, 7]. Это обусловлено достаточно низкой температурой

полотна, при которой довольно прочны связи влаги с волокном. В связи с этим, возникает необходимость быстрого доведения температуры бумаги до заданного значения (окончания прогрева). Уменьшение времени прогрева бумажного полотна положительно сказывается на последующих этапах сушки, поскольку будет обеспечено плавное удаление основной части влаги, что положительно скажется на однородности и качестве продукта [5, 6, 7]. Но поскольку бумага относится к капиллярно-пористым коллоидным телам, то при резком повышении температуры происходят необратимые процессы разрушения внутренней структуры, что ухудшает качественные показатели, приводит к загрязнению поверхности сушильных цилиндров и снижает КПД сушки.

Целью статьи является разработка алгоритма расчёта оптимального температурного графика прогрева, который обеспечит быстрое нагревание бумаги до заданного значения при соблюдении ограничений на качественные показатели конечного продукта.

Характеристика прогрева бумажного полотна. Бумага поступает на сушильную часть БДМ с влажностью 55...60 % и температурой 15...25 °С. Температура греющей поверхности может достигать 95...150, температура пара внутри цилиндров – 160...165 °С при избыточном давлении пара 0,5...1,0 МПа. Совокупность температур сушильных цилиндров (и пара внутри них), формирует режим сушки. Он может изменяться в зависимости от особенностей полотна, за счёт чего производительность сушки может быть повышена в 1,3...1,4 раза. В зависимости от вида бумаги и особенностей машины, в конце прогрева температура материала должна составлять от 80 до 120 °С [1].

Изменение температуры при прогреве (рис. 2) происходит в несколько этапов: повышение температуры на сушильном цилиндре (кривая 1–2) и спад при прохождении по участку свободного хода (кривая 2–3).

Ограничения на изменение температуры бумаги. Качество готовой бумаги определяется требованиями стандарта [2]. Несоблюдение хотя бы одного из показателей качества относит бумагу к более низкому классу и снижает её стоимость. Поэтому в качестве ограничения следует выбирать наиболее чувствительные к изменениям температуры показатели. Они будут формировать допустимые границы изменения температуры бумаги на каждом цилиндре.

Изначально важно установить границы параметров качества, которые соответствуют конкретному виду бумаги, и определить соответствующие им значения и допустимые изменения температуры (рис. 3, 4):

$$T_{гр}(P_2) \leq T_{p,1} \leq T_{гр}(P_1), \quad (1)$$

где $T_{гр}(P_1)$ и $T_{гр}(P_2)$ – граничные значения температуры, которые соответствуют допустимому значению показателя качества, указанному в стандарте, °С. При этом всегда выполняется условие $T_{гр}(P_2) \leq T_{гр}(P_1)$.

Ограничение (1) – это ограничение на конечную температуру прогрева.

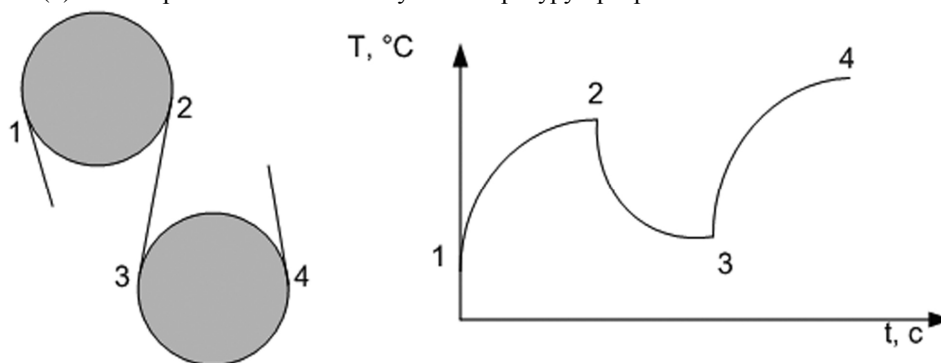


Рис. 2 – Изменение температуры бумажного полотна при прохождении по сушильному цилиндру и участку свободного хода

Условие допустимого изменения температуры бумаги на конкретном цилиндре:

$$\Delta T_n = f(\Delta T_{доп, n}, T_{n0}), \quad (2)$$

где ΔT_n – изменение температуры бумаги на цилиндре n ; $\Delta T_{доп, n}$ – допустимое изменение температуры согласно параметрам качества, °С; T_{n0} – температура бумаги на входе на цилиндр n , °С.

В каждом цикле прогрева существуют две критические точки, которые соответствуют температуре на сходе с сушильного цилиндра (точка 2 на рис. 2, первая критическая точка) и в конце участка свободного хода (точка 3 на рис. 2, вторая критическая точка). Следовательно, для построения температурного графика необходимо рассчитывать два набора значений температуры.

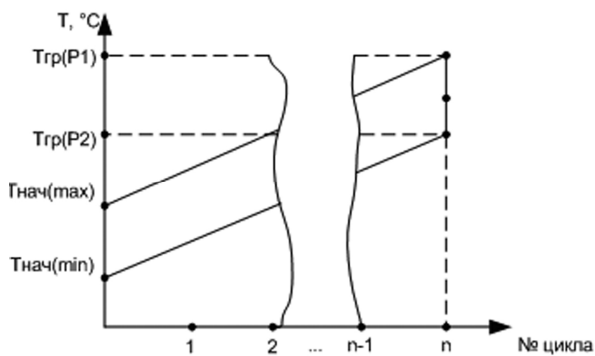


Рис. 3 – Область допустимых значений температуры полотна по мере прохождения по участку прогрева

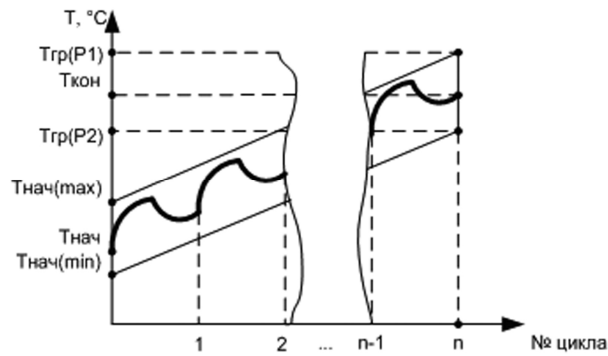


Рис. 4 – Температурный график прогрева бумажного полотна с ограничениями на температуру бумаги

Количество циклов n и, следовательно, сушильных цилиндров, определяется видом бумаги и особенностями БДМ (выбирается количество, которое обеспечивает достижение бумагой температуры мокрого термометра). Их количество на этапе прогрева (левые части линий до установления постоянного значения температуры на рис. 4) может изменяться от 3 до 15 штук [2].

Алгоритм расчёта температурного графика прогрева. Общий алгоритм расчёта целесообразно представить в виде пошагового алгоритма в реальном времени [6, 7]. Это даёт возможность его реализации при помощи специального математического и программного обеспечения (СМПО) для моделирования сушки и создания системы автоматического управления сушильной частью БДМ.

Алгоритм состоит из двух частей: расчёт температуры бумажного полотна на сушильном цилиндре и на участке свободного хода (рис. 5). Для каждого из них существует своё задание по конечной температуре (T_3 и $T_{3,сх}$). Расчёт начинаем с момента поступления бумаги на первый сушильный цилиндр.

Шаг 1. Ввод начальных параметров процесса, температуры и влажности бумаги при входе на сушильный цилиндр, параметров сушильного цилиндра и окружающей среды на участке свободного хода.

Шаг 2. Выбор величины нагрева бумаги на сушильном цилиндре (зависит от начальной температуры T_{n0} и допустимой величины изменения температуры $\Delta T_{доп}$ ограничения по качеству (2)).

Шаг 3. Если температура на сходе с текущего сушильного цилиндра превышает температуру задания $(T_{n0} + \Delta T_{доп}) \geq T_3$ следует уменьшить $\Delta T_{доп}$, иначе это приведёт к перегреву полотна и снижению качественных показателей, и перейти к шагу 4. Если $(T_{n0} + \Delta T_{доп}) < T_3$ переходим к расчёту температуры на выходе сушильного цилиндра, шаг 5.

Шаг 4. Рассчитываем допустимое изменение температуры бумажного полотна на текущем сушильном цилиндре (без перегрева) $\Delta T_n = T_3 - T_{n0}$ и переходим к расчёту температуры в конце сушильного цилиндра, шаг 5.

Шаг 5. По температуре в начале сушильного цилиндра T_{n0} и величине нагрева ΔT_n рассчитываем температур в конце текущего цилиндра $T_n = T_{n0} + \Delta T_n$. После схода с сушильного цилиндра, бумага проходит по участку свободного хода. Температура полотна на выходе $T_{н,сх} = 21,844 \ln p_n - 2,564$, где p_n – парциальное давление на поверхности материала, Па. Данная величина зависит от температуры бумаги в начале участка свободного хода и на сходе с сушильного цилиндра. В зависимости от величины температуры расчёт p_n ведут по разным формулам.

Шаг 6. Если $T_n < 60$ °С, то для расчёта p_n переходим на шаг 7, иначе – шаг 8.

Шаг 7. Рассчитываем $p_n = \frac{p_{ов} + (p_{п0} - p_{ов})}{\exp \frac{\beta_p r \tau_{сх}}{P_{сн} (c_c + c_w u)}}$, где $p_n, p_{ов}$ – парциальные давления на поверхности

материала и в окружающей среде, Па; β_p – коэффициент массообмена, отнесённый к разности парциальных давлений, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$; c_c и c_w – удельные массовые теплоёмкости сухого материала и воды, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; τ – время прохождения бумаги по участку свободного хода, с; $P_{сн}$ – масса квадратного метра сухого полотна, $\text{г}/\text{м}^2$; u_0 – влагосодержание бумажного полотна, $\text{кг}/\text{кг}$. После этого переходим к шагу 11.

Шаг 8. Если 60 °С $\leq T_n < 80$ °С, переходим к шагу 9. Если $T_n > 80$ °С, переходим к шагу 10.

Шаг 9. Определяем p_n из формулы $\frac{(\sqrt{p_n} - \sqrt{p_{ов}})(\sqrt{p_{п0}} + \sqrt{p_{ов}})}{(\sqrt{p_n} + \sqrt{p_{ов}})(\sqrt{p_{п0}} - \sqrt{p_{ов}})} = 4a \exp \frac{\beta_p r \tau_{сх}}{P_{сн} (c_c + c_w u)}$, после чего

переходим к шагу 11.

Шаг 10. Определяем p_n методом итераций:

$$\frac{1}{6\rho_{\text{ов}}^{0,67}} \left(\ln \frac{(p_{\text{ов}}^{0,33} - p_{\text{п}}^{0,33})^2}{p_{\text{ов}}^{0,67} + p_{\text{ов}}^{0,33} p_{\text{п1}}^{0,33} + p_{\text{п1}}^{0,67}} + \frac{1}{p_{\text{ов}}^{0,67} \sqrt{3}} \operatorname{arctg} \frac{2p_{\text{п}}^{0,33} + p_{\text{ов}}^{0,33}}{p_{\text{ов}}^{0,33} \sqrt{3}} - \right. \\ \left. - \ln \frac{(p_{\text{ов}}^{0,33} - p_{\text{п0}}^{0,33})^2}{p_{\text{ов}}^{0,67} + p_{\text{ов}}^{0,33} p_{\text{п0}}^{0,33} + p_{\text{п0}}^{0,67}} + \frac{1}{p_{\text{ов}}^{0,67} \sqrt{3}} \operatorname{arctg} \frac{2p_{\text{п0}}^{0,33} + p_{\text{ов}}^{0,33}}{p_{\text{ов}}^{0,33} \sqrt{3}} \right) = \frac{\beta_p r \tau_{\text{сх}}}{P_{\text{сп}} (c_c + c_w u)}.$$

Переходим к шагу 11.

Шаг 11. По полученному значению $p_{\text{п}}$ (в зависимости от начальной температуры) рассчитываем температуру в конце участка свободного хода $T_{\text{п,сх}} = 21,844 \ln p_{\text{п}} - 2,564$.

Шаг 12. Если $T_{\text{п,сх}} = T_{3,\text{сх}} \pm e$, где e – максимально допустимое отклонение температуры в конце участка свободного хода, то процесс прогрева закончен и система выдаёт температурный график сушки (оптимальные значения температуры бумаги на каждом сушильном цилиндре и участке свободного хода). Иначе процесс нагревания необходимо продолжить на следующем сушильном цилиндре и перейти к шагу 13.

Шаг 13. Значению температуры на входе на следующий сушильный цилиндр присваивают температуру в конце участка свободного хода и расчёт повторяют.

Выводы и направления дальнейшего исследования. С целью обеспечения наилучшего качества сушки бумажного полотна разработан алгоритм расчёта оптимального температурного графика прогрева, позволяющий определить температуры полотна на каждом сушильном цилиндре и участке свободного хода.

Алгоритм является частью разрабатываемой системы автоматического управления сушильной частью бумагоделательной машины. Предметом дальнейших исследований является практическая реализация и тестирование последней.

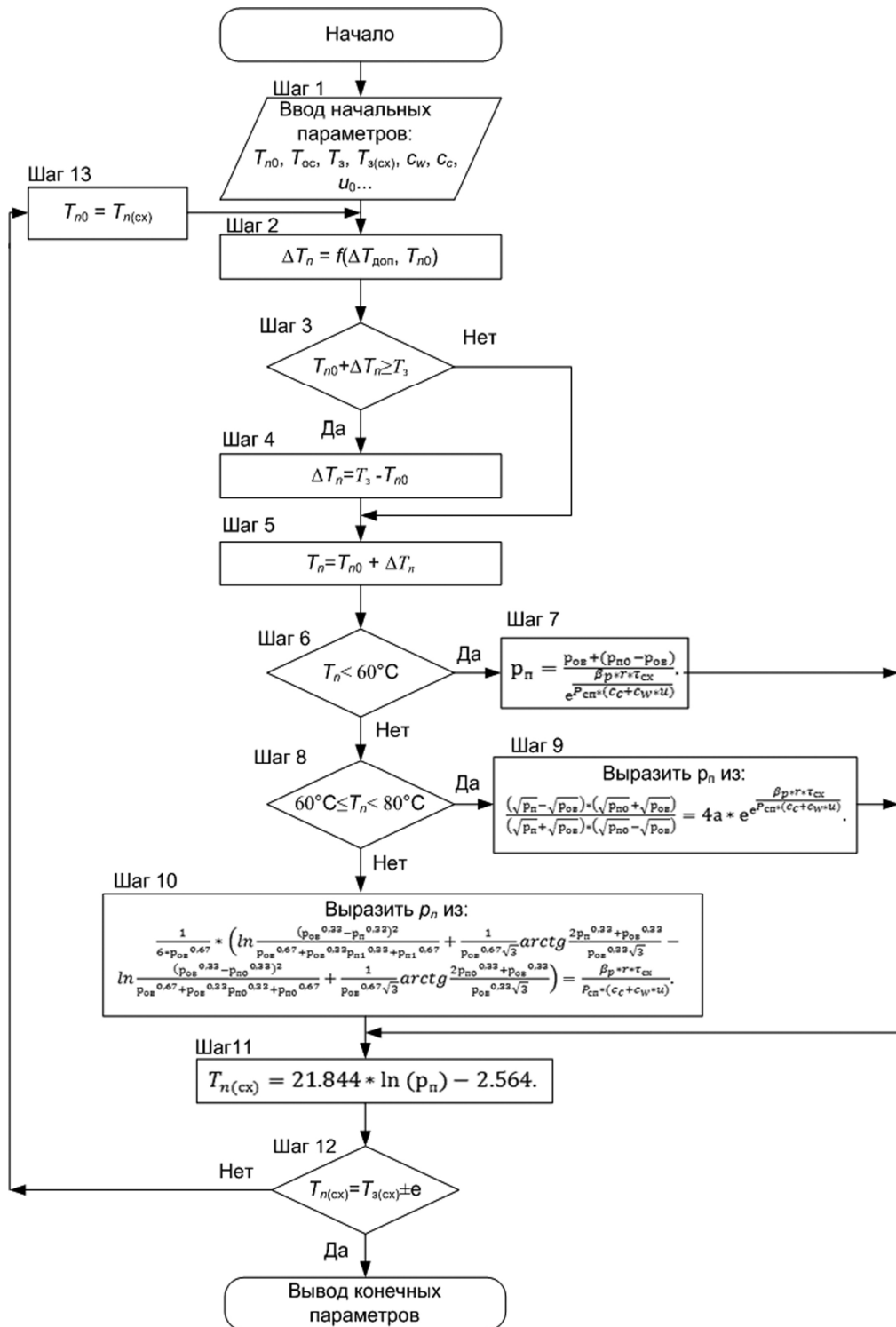


Рис. 5 – Блок-схема расчёта графика прогрева бумажного полотна

Список использованной литературы

1. Фляте Д. М. Технология бумаги / Д. М. Фляте. – М. : Лесн. пром-ть, 1988. – 440 с.
2. Примаков С. Ф. Технология бумаги и картона / С. Ф. Примаков. – М. : Экология, 1996. – 304 с.
3. Бельский А. П. Теплообмен при сушке бумаги на многоцилиндровых установках / А. П. Бельский // Межвуз. сб. науч. тр. «Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на промпредприятиях и ТЭС». – 2007. – С. 36-45.
4. Ghosh A. K. Optimization of paper machine dryer section / A. K. Ghosh // Proc. of 7th Int. Conf. on Pulp, Paper and Conversion Ind., New Delhi. 2005.
5. Some aspects of the combined contact-impingement drying of paper / R. Talja, O. Timofeev, J. Keränen, N. Milosavljevic // Int. State-of-the-Art Conf. «Resource- and energy saving in the pulp and paper industry and municipal economy (process, equipment, automation)». – SPb : State Technological University of Plant Polymers, 2005. – P. 237-242.

6. *Karlsson M., Stenström S.* (2005) Static and Dynamic Modelling of Carboard drying, Part I: Theoretical model, *Drying Technology* 23 (1-2), p. 143-163.
7. *Slätteke O.* (2006) Modeling and Control of the Paper Machine Drying Section, Doctoral Dissertation, Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology, Sweden.
Yeo Y.-K.; Hwang K.-S.; Chul Yi, S. and Kang, H. Modeling of the Drying Process in Paper Plants, *Korean J. Chem. Eng.*, 21(4), 761-766, 2004.